

УДК 621.9

**Г.П. КЛИМЕНКО**, д-р техн. наук,  
**В.В. КВАШНИН**, Краматорськ, Україна

## **ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ІНСТРУМЕНТІВ ЗБІРНОЇ КОНСТРУКЦІЇ**

Математична модель для визначення надійності модульних інструментів за допомогою методу резервного копіювання. Ми розглядаємо три типи забезпечення: завантаженого, розвантаженого та легкий. Залежності, отримані для розрахунку надійності ріжучих інструментів, використовуваних для прогнозування їх ефективності. Математична модель надійності модульної причіпної фабрики розроблена як системи. Визначено стратегію заміни ріжучих елементів млина для досягнення доцільного рівня її надійності, яка визначається критерієм приведених витрат.

**Ключові слова:** модульні інструменти, розрахунок надійності

Математическая модель для определения надежности модульных инструментов с помощью метода резервного копирования. Мы рассматриваем три вида обеспечения: загруженный, разгруженный и легкий. Зависимости, полученные для расчета надежности режущих инструментов, используемых для прогнозирования их эффективности. Математическая модель надежности модульной прицепной мельницы разрабатывается как системы. Определена стратегия замены режущих элементов мельницы для достижения целесообразного уровня ее надежности, которая определяется критерием приведенных затрат.

**Ключевые слова:** модульные инструменты, расчет надежности

The mathematical model for determining the reliability of modular tools with the method of backup. We consider three types of provision: loaded, unloaded and lightweight. The dependences obtained for calculating the reliability of cutting tools used to predict their performance. The mathematical model of reliability of a modular trailer mill is developed as systems. Strategy of replacement of cutting elements of a mill for achievement of expedient level of its reliability which is defined by criterion of the resulted expenses is defined.

**Keywords:** modular tooling, reliability

### **Вступ**

Прогнозування надійності різальних інструментів при підвищенні ступеня автоматизації металорізальних верстатів потребує розробки нових математичних моделей, дозволяючих прогнозувати відмови інструментів, від яких залежать зростаючі по вартості простої обладнання. Особливу актуальність точність прогнозування безвідмовності має для збірних твердосплавних різців важких верстатів, відмови яких досягають при чорновій обробці 45%, а час заміни великовагового інструменту збільшується зі збільшенням типорозміру верстата і коливаються від 10 до 55 хвилин.

Особливістю роботи збірного багатолезового інструменту є одночасна участь в роботі декількох ріжучих зубців. Аналіз роботи збірних кінцевих фрез у виробничих умовах показав, що при відмові одного зубця фрези

інструмент не знімається з верстата. Статистичний аналіз роботи 22 фрез  $z = 4$  в виробничих умовах ЗАТ НКМЗ при обробці сталі 9ХС з глибиною різання  $t = 4..6$  мм, подачею  $S_z = 0,12 \dots 0,15$  мм / зуб і швидкістю різання  $V = 62,8$  м/хв показав, що найчастіше (92% випадків обробки) фреза знімається з верстата при виході з ладу всіх 4-х зубців. Така експлуатація фрез призводить до підвищеної витрати інструментальних матеріалів. Характерною відмовою пластин фрези є їх поломка, а не досягнення критерію затуплення пластини. Статистичний аналіз показав, що закон розподілу стійкості фрез – експоненціальний.

Прогнозування рівня надійності інструментів дозволяє організувати регламентовану заміну інструменту і скоротити простої верстата.

### Основна частина

**Метою** цієї роботи є підвищення ефективності металообробки шляхом прогнозування надійності збірних різців і фрез і скорочення простоїв у зв'язку з їх відмовами.

При розробці математичних моделей збірний різальний інструмент розглядається як система.

З точки зору надійності різці з твердосплавними багатограними непереточуваними пластинами мають паралельне з'єднання ріжучих елементів, так як система (інструмент) відмовляє тільки після виходу всіх елементів (ріжучих вершин) з ладу [1]. Найбільш ефективним методом підвищення надійності таких систем є метод резервування. Існує два методи резервування: загальне, при якому резервується система в цілому, і роздільне (поелементне) резервування, при якому резервуються окремі елементи системи.

Загальне резервування для збірного ріжучого інструменту можливо реалізувати застосуванням різних зміцнюючих технологій, що підвищують надійність всієї багатогранної пластини. Поелементне резервування для збірного різця здійснюється введенням в зону обробки нового різального елемента при відмові попереднього шляхом повороту багатогранної пластини. При обробці збірними фрезами характер резервування дещо інший, так як при відмові однієї ріжучої вершини фрези її працездатність не порушується до деякого часу, а навантаження ріжучого елемента який відмовив приймають на себе працездатні ріжучі грані що залишилися [2, 3].

При цьому, в першому випадку резервування здійснюється з цілою кратністю, при якому нормальна робота різця здійснюється шляхом заміни грані яка відмовила послідовно  $(n-1)$  гранню  $n$ -гранної пластинки. Резервуванням з дробовою кратністю називають таке резервування, при якому резервні елементи припадають на кілька основних, як у випадку фрезерування, наприклад, торцевими збірними фрезами [4].

Розглядаючи працездатність збірного різця з точки зору його надійності заміщенням, можливі три види умов роботи граней пластини до моменту їх включення в різання.

Перший вид - навантажений резерв, при якому ресурс граней пластини починає витрачатися з моменту включення всієї пластини в роботу. При цьому необхідно враховувати теплові потоки і напруження всієї пластини, хоча в зоні різання знаходиться одна вершина. Закони розподілу стійкості та ймовірність безвідмовної роботи для всіх вершин будуть однаковими.

Другий вид резерву характеризується тим, що зовнішні умови, що впливають на ріжучі грані, які не перебувають в роботі, до моменту їх включення в роботу – полегшені. У цьому випадку інтенсивність витрати резервних граней трохи нижче, ніж в першому випадку. Це відповідає стану всієї ріжучої пластини досить великих розмірів з достатнім віддаленням від робочої ріжучої кромки всіх інших граней.

Третій вид резерву - холодний або ненавантажений. Цією моделлю надійності можна користуватися при припущеннях, що ріжуча грань починає витрачати свій ресурс тільки з моменту повороту пластини і заміни грані яка відмовила. При цьому на рівень надійності різця буде впливати інтенсивність заміни грані що відмовила, яка залежить від конструкції різця та є показником його ремонтпридатності.

Загальна формула для розрахунку надійності збірного різця з  $n$  - гранною непереточуваною пластиною має вигляд:

$$R_n(t) = R_{n-1}(t) + \int_0^t R(t, \tau) a_n(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где  $R_n(t)$  – надійність різця з  $n$  - гранною пластиною;

$R(t, \tau)$  – надійність однієї резервної грані у період часу  $t - \tau$  за умови, що до моменту часу  $\tau$  вона працездатна;

$a_{n-1}(\tau)$  – частота відмов збірного різця при  $(n - 1)$  поворотах пластини.

Імовірність відмови різця  $Q_n(t)$  визначається:

$$Q_n(t) = \int_0^t Q(t, \tau) a_{n-1}(\tau) d\tau, \quad (2)$$

де  $Q(t, \tau)$  - імовірність відмови резервної грані протягом часу  $t - \tau$ .

Формули (1) і (2) дозволяють обчислити рівень надійності збірних різців з  $n$ -гранними пластинами (кратність резервування дорівнює  $n - 1$ ).

У випадку, коли резервні грані пластини втрачають надійність з моменту заміни елемента, що відмовив (третій вид резерву), відмова  $(n - 1)$  граней пластини до моменту  $\tau$  статися не може, тобто накопиченням ушкоджень у всій пластині при роботі однією гранню нехтуємо.

Імовірність безвідмовної роботи збірного різця в цьому випадку визначається:

$$R_n(t) = R_{n-1}(t) + \int_0^t R(t, \tau) a_n(t) d\tau = 1 - \int_0^t Q(t, \tau) a_{n-1}(\tau) d\tau, \quad (3)$$

Формула (3) дозволяє обчислити рівень надійності збірного різця при будь-яких законах розподілу часу роботи кожної грані пластини.

У випадку експоненціального закону розподілу стійкості кожної грані збірного різця, розрахунок його показників надійності:

а) при полегшеному резерві:

$$R(t) = e^{-\lambda_0 t} \prod_{i=1}^n \left[ 1 + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{a_i}{i!} (1 - e^{-\lambda_0 t})^i \right]; \quad (4)$$

б) при ненавантаженому резерві:

$$R(t) = e^{-\lambda_0 t} \prod_{i=1}^n \left[ \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!} \right]; \quad (5)$$

де  $i = 1 \dots n$  - число граней ріжучої пластини збірного різця;

$\lambda$  - інтенсивність відмов пластин за період  $0 - t$ .

Представлені вирази дозволяють обчислювати надійність збірного різця в залежності від інтенсивності відмов кожної вершини його ріжучої пластини.

При розгляді збірної фрези як системи різальних елементів, в якій відмова одного з них не призводить до повної відмови фрези, з точки зору надійності фреза являє собою паралельну систему з пасивним резервом. В цьому випадку, при відмові першої різальної пластини її навантаження при різанні сприймає наступна за нею різальна пластинка. При цьому надійність фрези в цілому знижується, тобто зменшується ймовірність безвідмовної роботи. Для кінцевої фрези, що має два зуба:

$$[P_1(t) + Q_1(t)][P_2(t) + Q_2(t)] = 1, \quad (6)$$

де  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$  - ймовірність безвідмовної роботи відповідно першого і другого зуба фрези;  $Q_1(t)$ ,  $Q_2(t)$  - ймовірність відмови кожного зуба.

Після множення отримаємо:

$$P_1(t)P_2(t) + P_2(t)Q_1(t) + Q_2(t)P_1(t) + Q_1(t)Q_2(t), \quad (7)$$

де  $P_1(t)P_2(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи обох зубів протягом часу  $t$ ;  $P_2(t)Q_1(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи одного зуба при наявності відмови другого зуба;  $Q_1(t)Q_2(t)$  – ймовірність відмови двох зубів за час  $t$ .

Сума перших трьох членів в (7) являє собою ймовірність безвідмовної роботи фрези з двох зубів у випадку, якщо робота хоча б одного з них є ознакою працездатності фрези. Підставивши  $Q(t)=1-P(t)$ , отримаємо:

$$P_{\phi p} = P_1(t) + P_2(t) - P_1(t)P_2(t). \quad (8)$$

При експоненціальному законі розподілу часу безвідмовної роботи кожного зуба фрези отримуємо:

$$P_{\phi p} = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t},$$

де  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – інтенсивність відмов зубів фрези.

Тоді середній період стійкості фрези визначається:

$$\bar{T}_{\phi p} = \int_0^{\infty} P_{\phi p} dt = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}; \quad (9)$$

У випадку якщо  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ , то

$$P_{\phi p} = 2e^{-\lambda_1 t} - e^{-2\lambda_2 t}; \quad \bar{T} = \frac{3}{2\lambda}.$$

Для твердосплавних фрез, що мають  $z = 2, 3, 4$  розрахунок імовірності безвідмовної роботи кожної фрези отримано аналогічно перемноженням імовірності двочленів (див. табл. 1).

Для визначення стратегії заміни ріжучих елементів фрез які відмовили введемо поняття кратності резервування  $k$ :

$$k = \frac{Z - Z_m}{Z_m},$$

де  $Z$  – число зубів фрези;  $Z_m$  – число зубів які відмовили.

Залежності  $P_{\phi p}(t)$  при резервуванні з різною кратністю наведені в таблиці 1.

Доцільний рівень надійності фрези визначається мінімумом сумарних витрат на експлуатацію інструменту та на його покупку.

Залежно від необхідного рівня надійності фрези вибирається стратегія заміни її ріжучих елементів. Підвищення надійності шляхом заміни одного зуба що відмовив призводить до недовикористання ресурсів фрези та підвищенню сумарних витрат. Найбільш доцільно з точки зору раціонального рівня надійності для фрези з  $Z = 4$  знімати її з верстата при виході з ладу 2-х зубів

Таблиця 1 – Вибір стратегії заміни пластин фрези

число зубів фрези	кратніс ть резерву вання	Імовірність безвідмовної роботи фрези				
		Імовірність безвідмовної роботи	Стратегія заміни зубів	$\lambda t$		
				0,5	0,75	1
$Z=2$	1/1	$P_{fp}(t) = 2P - P^2$	Після відмови 1-го зуба фреза знімається з верстата	0,7 301	0,8 431	0,6 005
$Z=3$	1/2	$P_{fp}(t) = 3P^2 - 2P^3$	Після відмови 2-х зубів фреза знімається з верстата	0,5 243	0,6 575	0,3 063
	2/1	$P_{fp}(t) = P^3 + 3P - 3P^2$	Після відмови 1-го зуба фреза знімається з верстата	0,6 721	0,8 288	0,4 683
$Z=4$	1/3	$P_{fp}(t) = 4P^3 - 3P^4$	Після відмови 1-го зуба фреза знімається з верстата	0,3 741	0,4 862	0,1 443
	2/2	$P_{fp}(t) = 6P^2 + 3P^4 - 8P^3$	Після відмови 2-х зубів фреза знімається з верстата	0,6 734	0,8 288	0,4 683
	3/1	$P_{fp}(t) = 4P + 4P^3 - 6P^2 - P^4$	Після відмови 1-го зуба фреза знімається з верстата	0,9 203	0,9 757	0,8 407

Доцільний рівень надійності збірного різця, який закладається на стадії його проектування визначається виходячи з економічних критеріїв: витрат на інструмент та експлуатаційних витрат. Залежність приведених витрат від рівня надійності збірного різця не має оптимуму, тому що підвищення надійності завжди потребує додаткових витрат. Однак, швидкість цих витрат [5] істотно підвищується в діапазоні ймовірності безвідмовної роботи, що дорівнює 0,7 - 0,8.

### Висновки

1. Розглядаючи збірний різальний інструмент як систему, застосовуючи методи теорії надійності, пов'язані з різними видами резервування, отримані математичні моделі для визначення показників безвідмовності збірних інструментів з багатограними непереточуваними пластинами.

2. На стадії проектування інструментів, розроблені залежності дозволяють визначати конструктивні параметри інструменту в залежності від необхідного рівня його надійності.

3. Отримані залежності дозволяють розраховувати рівень надійності інструменту при будь-якому законі розподілу його стійкості на стадії експлуатації.

4. Доцільний рівень надійності, визначений в залежності від сумарних витрат, забезпечується регламентованою заміною ріжучих пластин що відмовили.

**Список використаних джерел:** 1. Клименко Г.П. Применение марковских и полумарковских цепей при оценке надежности технологической системы/ Г.П. Клименко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Межд. сб. научных трудов. - Донецк: ДонНТУ, 2004. - Вып.28. - с.71-76 2. Клименко Г.П. Определение надежности концевых фрез сборной конструкции/ Г.П. Клименко, А.В. Хоменко, К.С. Чабан // Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем Вып.26. - Краматорск: ДГМА, 2010 с.63- 67 3. Клименко Г.П. К вопросу определения надежности многолезвийного инструмента/ Г.П. Клименко, - А.О. Денисова // Материалы IX международного научно - технического семинара, Тяжелое машиностроение. - Краматорск: ДГМА, 2011. - с.59 4. Клименко Г.П. Определение качества сборных торцовых фрез/ Г.П. Клименко, А.О. Денисова // - Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Вып. 28. - Краматорск: ДГМА, 2011. - с. 56 - 60 5. Клименко Г.П. Підвищення стабільності обробки деталей збірними різцями важких верстатів з ЧПК/ Г.П. Клименко, О. Ю. Андронов // Сучасні технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць. Вип.4. - Харків: НТУ «ХПІ», 2010. - 239 - 246 6. Клименко Г.П. Повышение точности обработки деталей на станках с ЧПУ / Г.П. Клименко, С.А. Полонников // Научный Вестник: ДГМА, - г. Краматорск, N1(13E), 2014. - с. 46-54.

**Bibliography (transliterated):** 1. Klimenko G.P. Primenenie markovskih i polumarkovskih cepej pri ocenke nadezhnosti tehnologicheskoy sistemy/ G.P. Klimenko // Progressivnye tehnologii i sistemy mashinostroeniya. Mezhd. sb. nauchnyh trudov. - Doneck: DonNTU, 2004. -Vyp.28. - s.71-76 2.Klimenko G.P. Opredelenie nadezhnosti koncevnyh frez sbornoj konstrukcii/ G.P. Klimenko, A.V. Homenko, K.S. Chaban // Nadezhnost' rezhushhego instrumenta i optimizacija tehnologicheskikh sistem Vyp.26. - Kramatorsk: DGMA, 2010 s.63- 67 3. Klimenko G.P. K voprosu opredeleniya nadezhnosti mnogolezviynogo instrumenta/ G.P. Klimenko, - A.O. Denisova // Materialy IX mezhdunarodnogo nauchno - tehnicheskogo seminar, Tjazeloe mashinostroenie. - Kramatorsk: DGMA, 2011. - s.59 4.Klimenko G.P. Opredelenie kachestva sbornyh torcovykh freh/ G.P. Klimenko, A.O. Denisova // - Nadezhnost' instrumenta i optimizacija tehnologicheskikh sistem. Vyp. 28. - Kramatorsk: DGMA, 2011. - s. 56 - 60 5. Klimenko G.P. Pidvishhennja stabil'nosti obrobki detalej zbirnimi rizcjami vazhkih verstativ z ChPK/ G.P. Klimenko, O. Ju. Andronov // Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni. Zbimik naukovih prac'. Vip.4. - Harkiv: NTU «HPI», 2010. - 239 - 246 6. Klimenko G.P. Povyshenie tochnosti obrabotki detalej na stankah s ChPU / G.P. Klimenko, S.A. Polonnikov // Nauchnyj Vestnik: DGMA, - g. Kramatorsk, N1(13E), 2014. - s. 46-54.